

Результаты настройки и испытаний на высоком уровне непрерывной ВЧ-мощности резонаторов-группирователей для ускорителя ISAC (Канада)

Ю.В. Былинский, А.В. Васюченко, А.И. Кваша, А.А. Меньшов, В.В. Парамонов,
А.В. Фещенко (ИЯИ РАН)
А.К. Mitra, G. Dutto, R.E. Laxdal, R.L. Poirier (TRIUMF)

ВВЕДЕНИЕ

В составе сооружаемого в лаборатории TRIUMF линейного ускорителя радиоактивных ионов для проекта ISAC [1] предусмотрены три резонатора-группирователя, устанавливаемые после первого, второго и третьего резонатора с трубками дрейфа. Основными требованиями, предъявляемыми к группирователям, являются работа в непрерывном режиме, высокое эффективное напряжение (до 0,33 МэВ) и широкий аксептанс по скоростям частиц (1,8 – 4,1%). Разработанные и изготовленные в ИЯИ РАН группирователи представляют из себя трехзачорную ускоряющую структуру типа “split-ring”. Прототип такого резонатора был успешно испытан в 1998 году [2], что позволило при расчетах, конструировании и изготовлении партии из трех резонаторов оптимизировать параметры и конструкцию резонаторов-группирователей. В процессе испытаний были измерены ВЧ-параметры группирователей и была введена номинальная ВЧ-мощность.



Рис. 1. Группирователь №1 (без передней крышки и тунера).

1. ОПТИМИЗАЦИЯ РАЗМЕРОВ

Прототип группирователя [2] был рассчитан на работу с напряженностью поля на поверхности трубок дрейфа $E_{smax} = 1,3E_k$, где E_k – критерий Килпатрика. Результаты испытания прототипа группирователя показали, что резонатор надежно работает при напряженности поля на поверхности трубок дрейфа $E_{smax} = 17$ МВ/м, т.е. при $E_{smax} = 1,5E_k$. Этот факт, а также изменение рабочей частоты (106,08 МГц вместо 105 МГц) послужили причиной выполнения новой серии расчетов по оптимизации размеров группирователей.

Основные параметры группирователей, удовлетворяющие требованиям динамики частиц в ускоряющей структуре [3], приведены в табл. 1.

Таблица 1. Основные параметры группирователей.

		Группирователь		
		№1	№2	№3
Скорость частиц	β	0.023	0.027	0.033
Диаметр апертуры	$2a$, мм	14	14	14
Длина резонатора	L , мм	98	116	141
Эффективное напряжение	U_{eff} , кВ	190	260	330

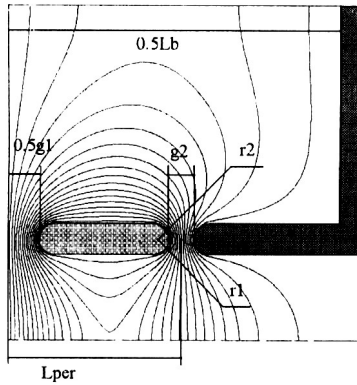


Рис. 2. Геометрия трубок дрейфа.

Поиск оптимальных размеров трубок дрейфа основывался на методике, описанной в работах [4, 5]. Оптимизации подлежали верхние и нижние радиусы скругления $r1$ и $r2$, а также длины средних и крайних зазоров $g1$ и $g2$ (рис. 2). Вычисления проводились в двумерном приближении для осесимметричного случая. Для каждой комбинации оптимизируемых параметров вычислялись значения максимального электрического поля на поверхности трубок дрейфа E_{smax} , фактора пролетного времени T и собственной емкости трубок дрейфа C . Полученные таким образом четырехмерные библиотеки данных (более 2000 вариантов для каждой скорости β) сводились к двумерным. Во-первых, для всех $r1$, $g1$ и $g2$ находилось значение $r2$, при котором оказывались равными поля на верхнем и нижнем скруглениях трубки дрейфа. Затем, для каждого значения $r1$ и $g1$ находилась длина зазора $g2$, которая обеспечивала бы равенство полей на поверхности в центральном и крайнем зазорах.

Полученные для каждой скорости β поверхности $T(r1, g1)$, $C(r1, g1)$ и $E_{smax}(r1, g1)$ анализировались с целью получения максимального значения T при минимальной величине C и при выполнении условия $E_{smax} \leq 1,5E_k$. Результаты оптимизации представлены в табл. 2.

Таблица 2. Результаты оптимизации геометрии трубок дрейфа.

		Группирователь		
		№1	№2	№3
Верхний радиус скругления	$r1$, мм	3,0	3,0	4,0
Нижний радиус скругления	$r2$, мм	6,5	6,5	6,5
Длина среднего зазора	$g1$, мм	9,94	12,70	18,20
Длина крайнего зазора	$g2$, мм	4,31	5,46	7,87
Длина трубки дрейфа	L_1 , мм	25,705	29,460	33,585
Длина полутрубки дрейфа	L_2 , мм	14,015	16,780	19,945
Диаметр трубок дрейфа	D_{dt} , мм	33	33	35
Фактор пролетного времени	T	0,862	0,887	0,910

Трехмерное моделирование структуры с оптимизированными размерами трубок дрейфа проводилось с помощью пакета программ MAFIA. Была показана возможность унификации размеров всех трех резонаторов – диаметра резонатора (550 мм), радиуса изгиба кольца “split-ring” (161 мм), диаметра поперечного сечения кольца (25,4 мм), диаметра штанги (54 мм). Что касается ошибки программы MAFIA в определении резонансной частоты (до 600 кГц), то подбор длины прямого участка кольца “split-ring” в процессе изготовления резонаторов гарантирует точное попадание частоты в диапазон регулировки тюнера. Расчетные ВЧ-параметры приведены в табл. 3. В табл. 4 представлено распределение ВЧ-потерь по участкам банчеров.

Таблица 3. Расчетные ВЧ-параметры.

		Группирователь		
		№1	№2	№3
Собственная добротность	Q	5706	6668	7773
Шунтовое сопротивление*	$R_{ш}$, МΩ	9,05	11,88	15,06
Напряжение на трубке дрейфа	V_t , кВ	55,1	73,3	90,7
Мощность потерь	P , кВт	5,36	7,24	8,74

*Шунтовое сопротивление $R_{ш} = (4 V_t)^2 / P = U_{эф}^2 / T^2 P$.

Таблица 4. Распределение ВЧ-потерь, %.

	Группирователь		
	№1	№2	№3
Обечайка и днища	26,1	22,9	19,5
Полутрубки дрейфа	0,3	0,3	0,3
Трубки дрейфа	0,6	0,6	0,7
Штанга	4,8	5,2	5,6
Прямой участок кольца “split-ring”	3,0	3,6	2,5
Конические штанги трубок дрейфа	1,0	1,0	0,9
Кольцо “split-ring”	64,2	66,4	70,5

2. ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ

Предварительная настройка частоты группирователей осуществлялась в процессе изготовления с помощью регулировки (укорачивания) длины прямого участка Lst . Так как измерения проводились без тюнера, группирователи настраивались на частоту $(106,40 \pm 0,05)$ МГц. Процесс настройки отображен на рис. 3.

Распределение поля на оси пучка и отношение $R_{ш}/Q$ измерялись методом малых возмущений. Измеренные величины $R_{ш}/Q$ совпали с расчетными значениями. Распределения полей показаны на рис. 4.

Измеренные собственные добротности оказались равными 4400 для 1-го группирователя, 5100 – для 2-го и 5900 – для 3-го, что составляет 76...77% от расчетных величин.

Механическая стабильность конструкции группирователей (устойчивость к внешним вибрациям) исследовалась путем измерения фазы колебаний на рабочей частоте при включенном протоке воды через каналы охлаждения. Изменение фазы колебаний не превышало $\pm 1,5^\circ$, что соответствует модуляции резонансной частоты ± 1 кГц.

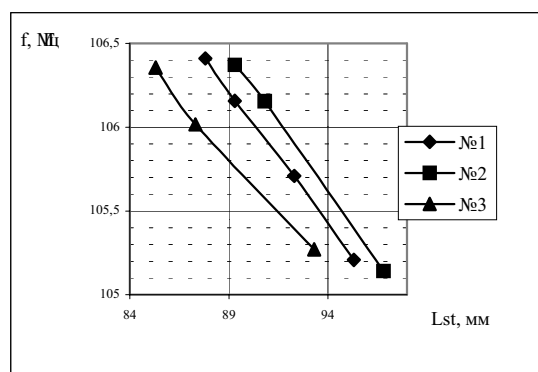


Рис. 3. Изменение частоты банчеров от длины прямого участка в процессе предварительной настройки.

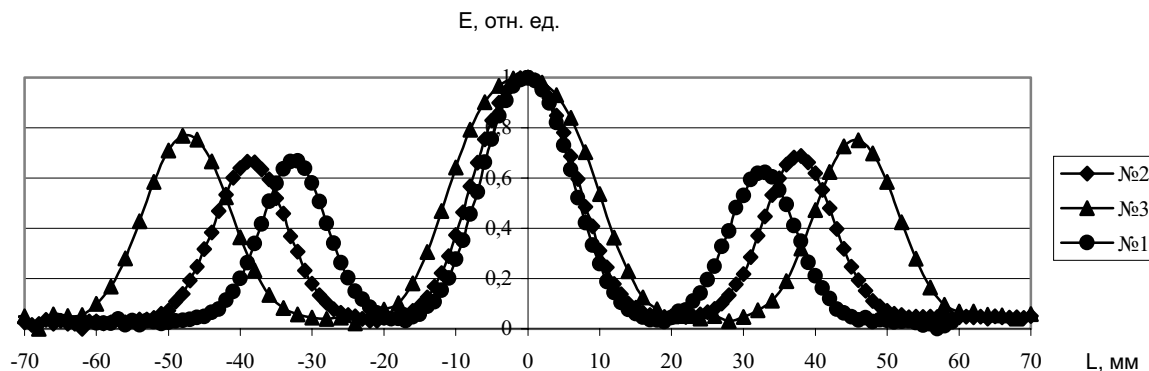


Рис. 4. Распределения полей на оси банчеров.

3. ИСПЫТАНИЯ НА ВЫСОКОМ УРОВНЕ МОЩНОСТИ

Вводу мощности предшествовало обезгаживание внутренней поверхности группирователей. Обезгаживание проводилось в течение 12–14 часов посредством прогрева горячей водой (~55°C), пропускаемой через каналы охлаждения. В результате прогрева и устранения микротечей в уплотнениях заглушек вакуум в банчерах улучшился с $(8-9) \cdot 10^{-7}$ Торр до $(2-3) \cdot 10^{-7}$ Торр.

Группирователи запитывались от ВЧ-генератора с выходной мощностью до 20 кВт. Тренировка проводилась при вакууме $5 \cdot 10^{-6}$ Торр (при пороге срабатывания защиты генератора по вакууму равном $1 \cdot 10^{-5}$ Торр) в непрерывном режиме генерации. Начало ввода мощности сопровождалось ухудшением вакуума, вызванным мультипакторным разрядом. При подъеме мощности наблюдались три уровня мультипакции. Первый уровень имел место при напряжении на трубках дрейфа 200 В в группирователе №1, 350 В – в группирователе №2 и 580 В – в банчере №3. Второй и третий уровень наблюдались соответственно при напряжениях 1,5 и 2,5 кВ во всех трех группирователях. Тренировка на низком уровне мощности проводилась на фиксированной частоте и длилась три–четыре часа. После прохождения третьего уровня мультипакции вакуум в банчерах скачком улучшался до $(4-5) \cdot 10^{-7}$ Торр. Дальнейший подъем мощности до номинального значения проводился в режиме самовозбуждения в течение 10–15 минут.

Резонаторы-группирователи стабильно работали при номинальном напряжении на трубках дрейфа. При повышении напряжения на 10% ВЧ-пробои также не наблюдались.

Напряжения на трубках дрейфа оценивались с помощью измерения уровня поля калиброванными измерительными петлями, при этом в расчетах использовались измеренные значения $R_{ш}$. Для сравнения проводилось измерение энергии рентгеновского излучения. Результаты совпали в пределах точности измерения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты проведенных испытаний подтвердили правильность расчетов и технических решений. Резонатор-группирователь №1 был установлен на линейный ускоритель и успешно прошел испытания с пучком [6]. Остальные группирователи будут устанавливаться и испытываться с пучком в конце 2000 года.

ЛИТЕРАТУРА

1. P. Bricault et al. Status Report on the Construction of the ISAC Drift Tube Linac. – Proc. of the 2000 Linac Conference.
2. Y.V. Bylinsky et al. High Power Test of the ISAC Triple Gap Buncher Operating in CW mode. – Proc. of the PAC-99, New York, March 29-April 2, 1999, pp. 893-895.
3. R.Laxdal. The Separated Function Drift Tube Linac for the ISAC, TRI-DN-97-4, TRIUMF Design Note, April 1997.
4. V.V. Paramonov. The Data Library for Accelerating Structures Development. – Proc. of the Linac Conference, CERN 96-07, Vol.2, p. 493.
5. I.V. Gonin et al. 2D Codes Set for RF Cavities Design. – Proc. of the 1990 EPAC Conference, 1990, p. 1249.
6. R.E. Laxdal et al. First Beam Test with the ISAC Separated Function DTL. – Proc. of the 2000 Linac Conference.